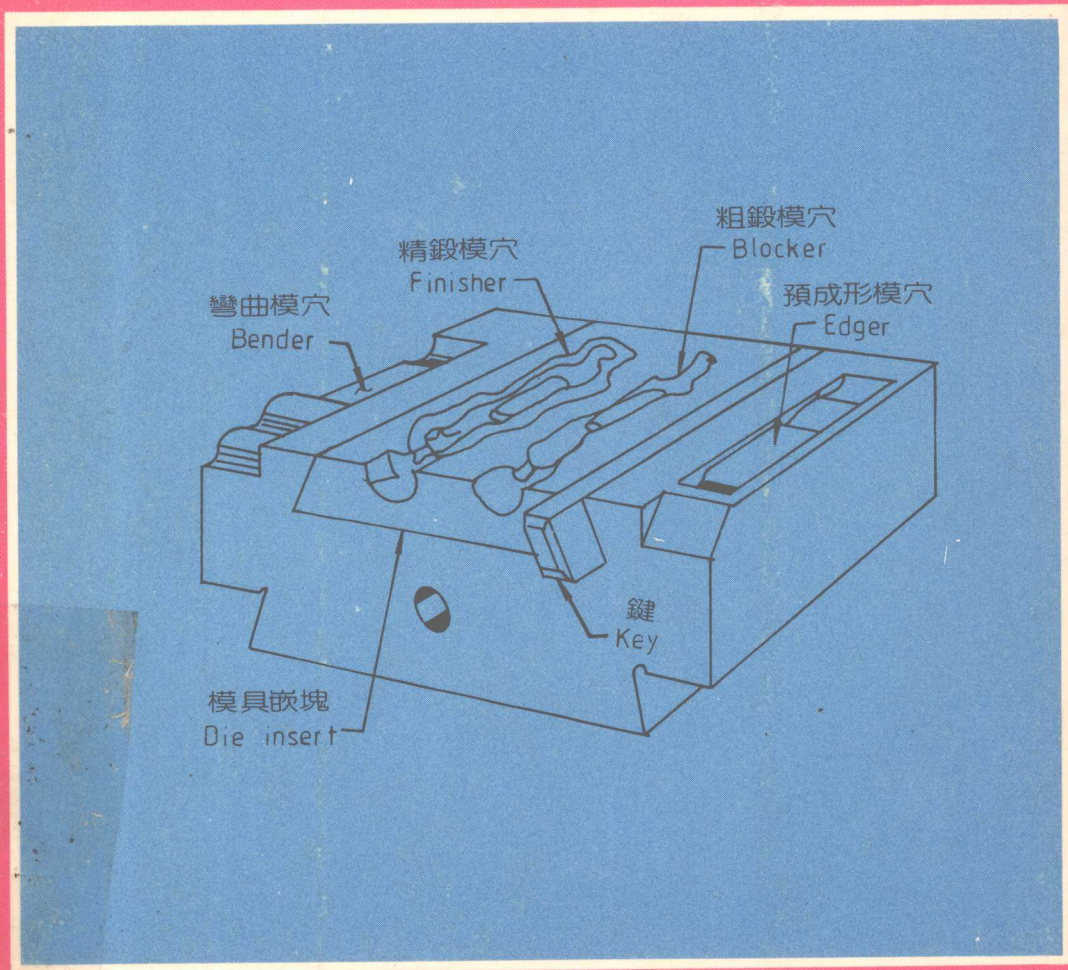


■ 鍛造模具技術叢書之一

熱鍛模具設計手冊



經濟部中小企業處補助經費
金屬工業發展中心編印
中華民國七十九年五月初版

版權所有
不准翻印

中華民國七十九年五月初版

鍛造模具技術叢書之一

(全四冊)

第一冊

熱鍛模具設計手冊

補助經費：經濟部中小企業處
台北市復興南路一段368號3F

編印者：金屬工業發展中心
高雄市楠梓區高楠公路1001號

出售處：金屬工業發展中心·機械設計組
高雄市楠梓區高楠公路1001號
電話：(07)3513121 分機285、286
FAX：(07)3 5 2 1 5 2 8

郵政劃撥：戶名：金工編輯委員會
帳號：0 4 3 3 6 1 5 — 0

印刷者：佳興印刷局企業有限公司
高雄市前鎮區一心一路172號
電話：(07)7712516 • 7718363(代表)
FAX：(07)7 7 1 7 8 6 7

熱 鍛 模 具 設 計 手 冊

前 言

鍛造為一具有悠久歷史且極重要之金屬加工方式，然國內有關鍛造之參考書籍卻寥寥可數，經濟部中小企業處有鑑於此，乃資助本中心從事本手冊之編印，本書係筆者參考各先進國家相關之鍛造書籍及國內先進之著作，拮取其精華并融合筆者淺見彙編而成，希望能對國內業界及在學諸君略有助益并祈不吝指正。

林 英 傑

1990.6.

熱 鍛 模 具 設 計 手 冊

目 錄

1. 熱鍛加工基礎.....	1
1.1 鍛造之意義	1
1.2 鍛造原理	7
1.3 鍛造方式	15
1.4 鍛造機械	25
1.5 鍛造系統及解析	78
1.6 鍛造發展趨勢	81
2. 鍛件設計.....	98
2.1 鍛件材料	98
2.2 鍛件設計	126
3. 鍛造製程.....	147
3.1 鍛造製程	147
3.2 剪 斷	147
3.3 加 熱	153
3.4 預 成 形	166
3.5 鍛 造	173
3.6 剪 緣	176
3.7 整 形	177
3.8 熱 處 理	177
3.9 表面清潔.....	191
3.10 表面塗裝.....	192
3.11 鍛造品的檢查.....	192
4. 鍛模設計	200
4.1 鍛造負荷及能量	200
4.2 鍛模材料	223

4.3	鍛模設計	240
4.4	模具加工	278
4.5	模具之表面處理	285
4.6	模具壽命	288
5.	設計實例	302
5.1	連 桿	302
5.2	連桿（多件鍛造）	308
5.3	釋放槓桿	315
5.4	剎車平衡槓桿	321
5.5	前 軛	329
5.6	齒輪胚（ I ）	332
5.7	齒輪胚（ II ）	334
5.8	曲軸（ I ）	338
5.9	曲軸（ II ）	345
附 錄		
一、	工具鋼規格對照表	352
二、	CNS 鍛造公差	370
三、	德國鍛造公差（ DIN ）	373
四、	JIS 鍛造公差	385
五、	溫間閉塞鍛造技術要點	400
六、	模具壽命之原因與對策	417
七、	熱處理失敗之實例	420

熱鍛模具設計手冊

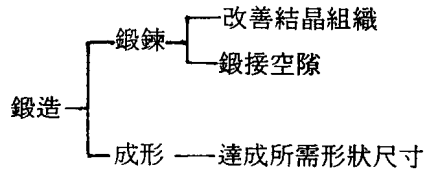
1. 熱鍛加工基礎

1.1 鍛造概述

1.1.1 鍛造的意義

鍛造是一種具有悠久歷史的金屬加工方式。所謂的鍛造品，係將高溫加熱之金屬材料置於鍛造機械（落錘或壓床等）上施加外力成形加工，並改進強度及韌性，完成所需尺寸之工件。由此可知，鍛造加工包含給與材料增加材料強度及韌性之鍛鍊加工及達成所需尺寸之成形加工兩者之組合。

表 1-1 鍛造加工的意義



1.1.2 鍛造加工的特徵

(1) 材質改善效果

(a) 加熱效果

鋼塊加熱後，偏析成份擴散，並趨向均質化。可參考表 1-2 之例。

表 1-2 加熱效果之一例

試料	方向	降 伏 點 σ_y [kgf/mm ²]	拉 伸 強 度 σ_B [kgf/mm ²]	伸 長 率 δ [%]	扭 曲 率 ϕ [%]	衝 擊 值 [kgf/mm ²]
對照	縱	87.5	95.4	18.6	61.2	11.4
	橫	86.2	96.2	12.8	24.3	4.3
均質	縱	86.5	96.8	20.6	60.8	11.9
	橫	86.2	96.7	15.3	34.0	5.4

注) 對照試料：840°C油淬火→635°C×2h調質

均質試料：1200°C×10h加熱→840°C不加熱，→840°C油淬火→630°C×2h調質

2 熱鍛模具設計手冊

(b) 壓著效果

鋼塊內氣孔等空隙缺陷，在高溫加熱軟化狀態下加壓後可獲得改善。可參考表 1-3 之例。

表 1-3 鋼塊壓著效果之一例

[壓力 50kgf/mm²]

方 向	加 壓	拉 伸 強 度 σ_B [kgf/mm ²]	伸 長 率 δ [%]	扭 曲 率 ϕ [%]	衝 擊 值 [kgf · m/cm ²]
縱	無	94	12	33	5.8
	有	90	21	53	8.5
橫	無	74	3	5	3.9
	有	87	17	48	9.3

(c) 變形效果

熱間加工時，鋼塊原有之樹枝狀組織、偏析、非金屬介在物等因變形而形成纖維組織，產生異方性，如表 1-4 所示。

表 1-4 厚鋼板之異方性之一例

方 向	拉 伸 強 度 σ_B [kgf/mm ²]	降 伏 點 σ_y [kgf/mm ²]	伸 長 率 δ [%]	扭 曲 率 ϕ [%]
壓 延	39.9	27.5	24.8	53.9
直 角	40.6	26.9	24.6	52.9
板 厚	32.7	25.0	5.0	3.7

壓著效果與變形效果總合稱之成形效果。成形效果在縱方向隨加工變形量之增加而增加，在橫方向則在達到最大值後減低，如圖 1-1 所示。

(d) 結晶粒度之影響

熱間加工之加工度、加工速度、加工溫度、加工終了溫度、加工終了後之冷卻速度等因素皆為調整結晶粒度之可能手段。一般單相金屬之降伏應力與結晶粒度之關係如下：

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

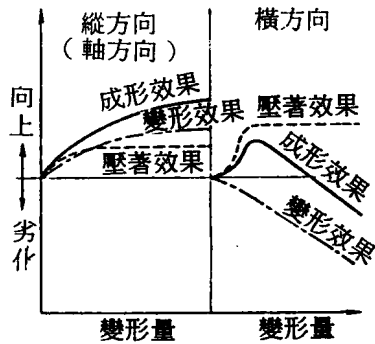


圖 1-1 成形效果與變形量之關係

σ ：降伏應力

σ_0 ：轉位之摩擦力

d ：結晶粒徑

k ：常數

由上式可知，結晶微細化可獲得較高的強度。

(e)結晶組織之改善

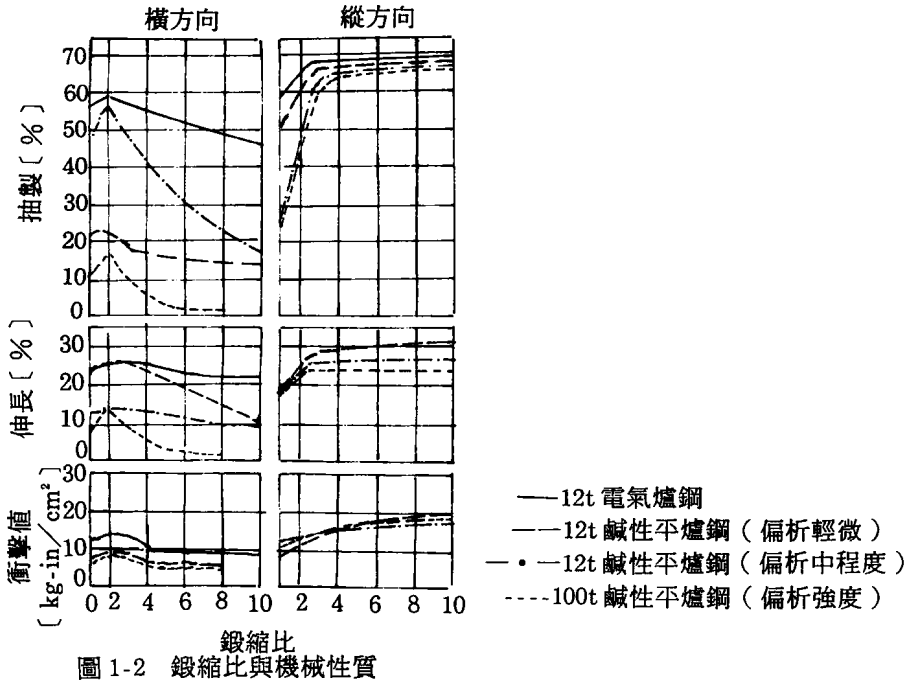
將高溫加熱狀態下之坯錠施以鍛壓成形時，其粗糙鑄造組織被機械壓碎而經由結晶過程變成細密，但若加工不足時，其機械外力無法滲入達到胚錠中心，將使鑄造之鬆弛組織或粗糙結晶殘留於其中，材料內外強度與韌性產生差異，即此機件已無鍛件之價值，故鍛造作業應細心檢討結晶組織之改善效果為要。

通常以鍛縮比或鍛縮係數來表示改善組織之效果即鍛造之程度。

$$\text{鍛縮比 (鍛縮係數)} = \frac{\text{加工前剖面積 } A_0}{\text{加工後剖面積 } A_1}$$

圖 1-2 表示鍛縮比與鋼材機械性質關係之一例，由圖可知最初由鍛縮比之增加機械性質隨之改善，直到其比為 3~4 以上時則趨於平坦，而材料之橫向與縱向機械性質少有差別，但如鍛縮比再多時，在縱向雖不顯著改善其性質，卻在橫向鍛縮比達 2 時，表示最高性質後有漸次劣化之趨向。實際鍛件形狀複雜，其鍛縮比在各部份亦呈差異，選擇鍛縮比時，需研討機件在使用時之應力分佈狀態，再加以適當取捨。

4 熱鍛模具設計手冊



(f) 鍛接空隙之效果

對加熱軟化之金屬材料塑性加工時，可以機械外力將殘留其內之縮孔、氣孔壓窄粘著、俾便消除影響鍛件品質之因素。一般鑄鋼材料大多有多種疵病散佈其中，經由鍛壓過程可將組織鬆弛之鑄鋼品改造為強韌之鍛鋼品。此種壓粘空隙之效果又被材料形狀、鋼砧形狀尺寸、變形量、變形速度等影響，因此，必須能將高強壓力滲透到鋼塊中心部份始可得到鍛造的目的。

鍛縮比亦可作為壓粘效果之標準，但因壓粘效果受制於鍛造設備、鍛造方法之影響較大，亦即單用鍛縮比做為判定高品質鍛件與否乃為言之過早不切實際，應多方求証才是。

(2) 可能成形的材料範圍廣

適合鍛造加工的材料，包括碳鋼、合金鋼、不銹鋼、鎳基、鈷基耐熱超合金、鋁、鎂等輕合金、銅等重金屬、以至鈦合金等，可說範圍相當廣。

表 1-5 所示為各種材料之鍛造性。圖 1-3 為各種材料之變形抵抗、鍛造性

變形抵抗 →

	小	中	大
鍛造性 ↓ 良 中 劣	1030 (C Steel) 4340 (Alloy Steel) H-11 (Tool Steel) 6061 (Al Alloy)	Type 304 (Stainless) Ti-6Al-4V	Molybdenum 16-25-6 (5stainless)
	A280 (Mq Alloy) 7075 (Al Alloy)	A-286 (Stainless) Inco 901 (Ni-Auoy) 17-7PH (Stainless) T1-5Al-25Sn	T1-13V-11C-3Al NI 55 (Ni-Cr-Co Alloy)
	1130 (Alloy Steet) Resulfurized Steels	Type 321 (Stainless) 15-7MO (Stanless)	Rene 41 (Ni Alloy) Hdstelloy (Ni Alloy) Hostelloy-B (Ni Alloy)

圖 1-3 各種材料變形抵抗與鍛造性關係

相關概念圖。圖 1-4 為各種金屬材料對各種塑性加工之適應能力圖。

(3)可以成形之尺寸、數量範圍廣

加工法	材料	鐵系材料														複合材料		燒結材料(鐵系)		
		鑄鐵	鑄鋼	球狀鑄鐵	合金鑄鐵	高Mn鑄鋼	其他鋼	低破鋼	中破鋼	高破鋼	非調質型	高力鋼	張調質型	低合金鋼	不銹鋼	複合鋼	粒子分散型		纖維強化型	
		鐵	鐵	鐵	鐵	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼	鋼		鋼	鋼
塑性加工	冷間鍛造																			
	溫間鍛造																			
	熱間鍛造																			
	板材成形																			

(▨ 可能 ▩ 一部可能有條件) □ 不可能及不明

圖 1-4 各種塑性加工法適合材料概圖

6 熱鍛模具設計手冊

表 1-5 各種材料鍛造性（在下方者鍛造性差）

輕金屬	鋁、鎂
鋼	低碳鋼、低合金鋼 不銹鋼，原子爐用材料（含鎢、矽）
高溫合金	鐵基超合金
重金屬	銅

鍛造可以成形的尺寸從小到數十公克之小機件（如圖 1-5 所示之桌上小計算機零件）大到一噸以上之重型機件（如圖 1-6 所示之飛機構件），成形範圍相當廣。生產數量亦可由數件至100萬件以上。

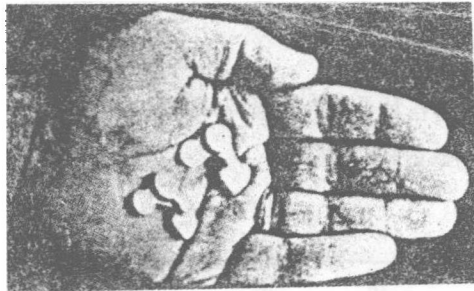


圖 1-5 小型鍛件之一例

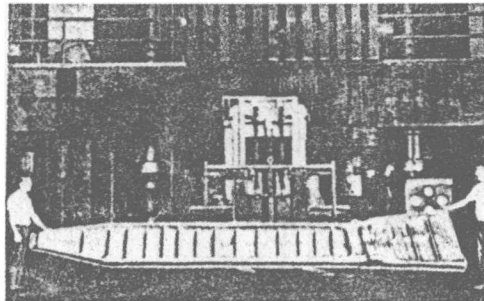


圖 1-6 大型鍛件之一例

(4)複雜、精密形狀亦可成形

由於使用高壓力、大變形使得複雜、精密之鍛件得以成形。

(5)可以做大變形加工

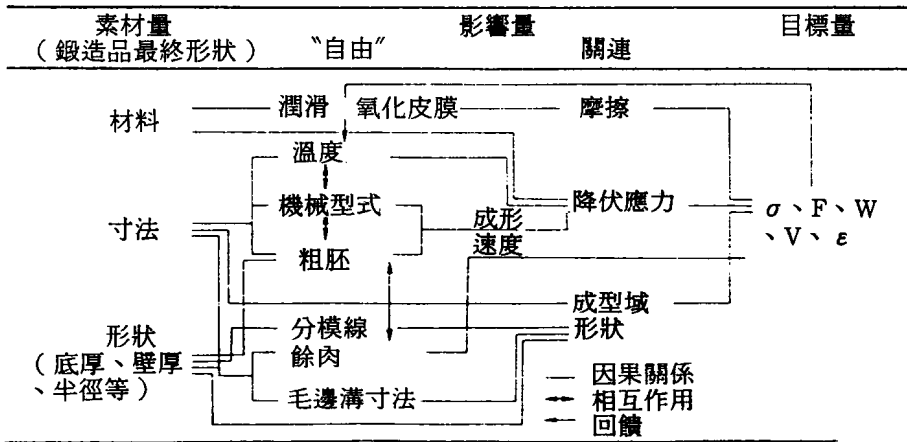
由於高壓力使材料變形程度大於一般加工。其中又以熱間鍛造變形效果最大。

1.2 鍛造原理

1.2.1 前言

如表 1-6 所示為鍛造成形過程中素材量、影響量及目標量之關係。

表 1-6 鍛造成形過程中素材量、影響量及目標量之關係



上表之關係就生產技術者及鍛造工廠內生產過程計劃而言，其應注意者為：

- (1) 模具表面應力及模具荷重應使其最小。
- (2) 選擇機械時，必須能負荷最大之成形力及能量。
- (3) 模具設計時必須考慮施力點及施力方向。
- (4) 素材形狀、粗胚形狀、毛邊尺寸及分模線等的選定將決定鍛流線、速度場、變形域及材料的流動。必須考慮如何使用最少材料獲得正常之鍛件。
- (5) 材料特性與變形分配之考量。

1.2.2 時間的量

8 熱鍛模具設計手冊

如圖 1-7 所示為模鍛時間與力之關係。其中可分為加工物流程時間、打擊時間、接觸時間、加壓接觸時間等。

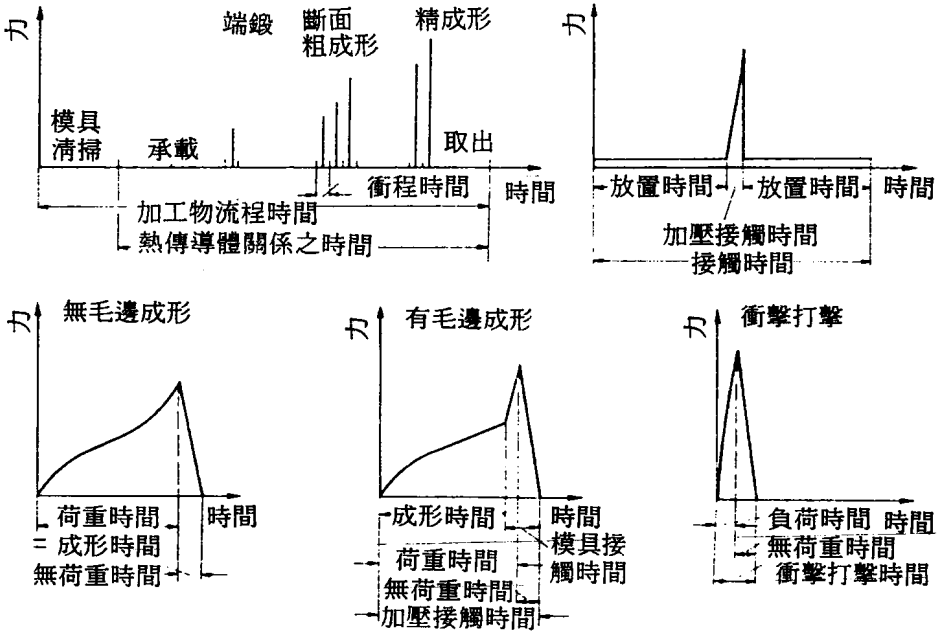


圖 1-7 鍛造過程之時間與力之關係

1.2.3 模具速度與成形速度

模具速度指在成形中模具相關部份之相對速度。對加壓接觸時間及成形速度均有重要影響。

成形速度與鍛造溫度降伏應力有關。通常可以成形速度 $\phi = d\phi / dt$ 表示。如圖 1-8 所示為圓柱狀加工物端鍛過程之成形速度。

1.2.4 鍛造變形

將鑄鐵等變形能力小的材料，車削成圓柱形，上下加以壓力後，從軸向切成兩片，經予腐蝕（Etching）並觀察其滑線（Slip line）以研判其內部應力分佈，即為圖 1-9 之狀況。

將軟鋼等變形能力大的材料，施以相同試驗，即為圖 1-10 所示，呈顯：I 之幾乎無變形部份，II 之激烈變形部份以及 III 之較為均勻變形部份之三種各不同特點之變形區域。

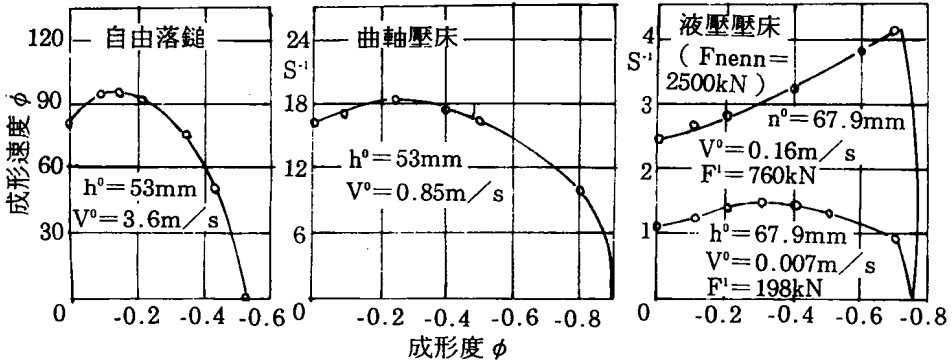


圖 1-8 圓柱狀加工物端鍛過程之成形速度

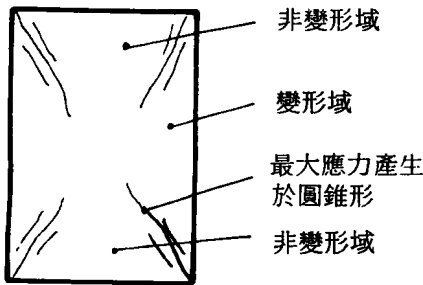


圖 1-9 鑄鐵變形圖

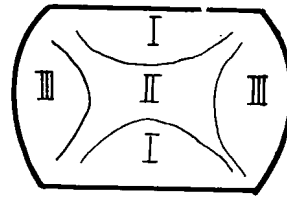


圖 1-10 軟鋼變形圖

在此，若圓柱高度過度顯著，Ⅲ部份則分為上下，中間呈示不動，變成葫蘆狀，而成為挫曲之原因。

1.2.5 鍛造所需之力量

壓縮力可用下列公式表示：

$$P = k_r \cdot A$$

其中， k_r 係材料固有變形強度， A 為壓縮面積。

設令模具上下面並無模摩擦，素材最初高度為 h_0 ，將加量 P 逐漸增加時，在某一點即開始彈性變形，繼而開始塑性變形。此時，上下模具接觸面積 A_0 之平均壓力 P_m 即為：

$$P_m = \frac{P}{A_0} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d_0^2}$$

10 熱鍛模具設計手冊

在此， P_0 相當於素材之降伏點，若再增加力量，素材高度即縮短，直徑即增大（若無體積之收縮）。

但於實際鍛造作業，模具表面與素材間必發生摩擦力。設令此摩擦力為 μk_r （ μ 為摩擦係數），素材即被摩擦力阻止，其橫向擴張運動被限制，導引反作用，而產生作用於相反方向之阻力 σ_x 。自橫向於 X 距離之流動阻力 σ_x ，即為：

$$\sigma_x = \int_0^x 2 \mu k_r \frac{dx}{h} = 2 \mu k_f \cdot \frac{X}{h}$$

在此假設作用於壓縮面之壓縮力 P_1 ，較以上式所計算流動阻力 σ_x 大於變形強度 K_r ，則流動阻力 σ_x 與壓縮力 P_1 在此成為主應力，因此自素材側面向中心於 X 距離處之作用於壓縮面之壓力 P_x 即為：

$$P_x = K_r + \sigma_x = K_r \left(1 + 2 \mu \frac{X}{h} \right)$$

因此作用於圓柱形素材全體之壓縮力 P 即為：

$$P = \int_0^r 2 \pi (r-x) dx P_x = A \cdot k_r \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{r}{h} \right)$$

亦即，摩擦作用於壓縮面時，即產生逆向阻力，其壓縮所需力量，較完全無摩擦損失時之變形所需力量大於下列部份。

$$A \cdot k_r \cdot \frac{2}{3} \mu \frac{r}{h}$$

相對於理論變形阻力 k_r ，今設阻力於變形之際，實際產生之單位面積阻力，亦即變形阻力為 K_f ，則：

$$K_f = \frac{P}{A} = k_r \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{r}{h} \right)$$

事實上，於實際鍛造作業，模具上下左右產生摩擦，更有形狀之拘束，必產生極為複雜之力學機構。

1.2.6 變形阻力

各種碳鋼之變形阻力與加工速度之關係圖示於圖 1-11 及圖 1-12：

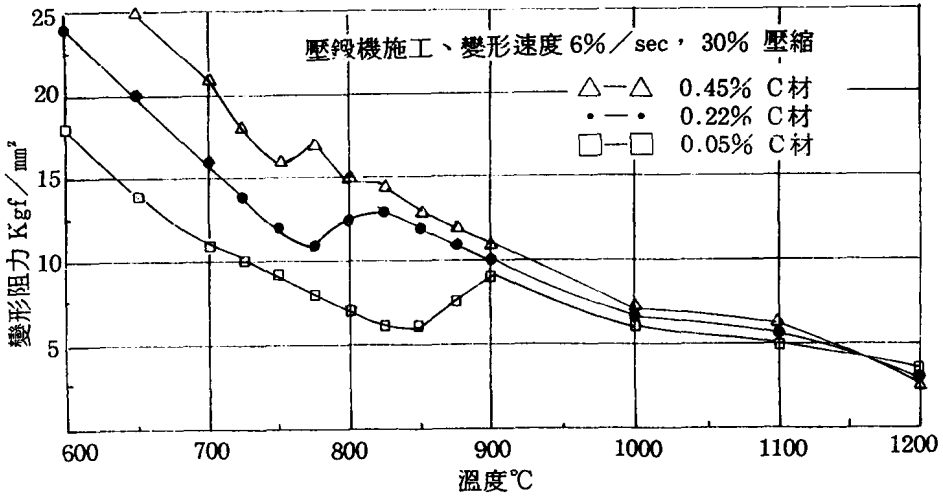


圖 1-11 各種碳鋼變形阻力與加工溫度之關係 (壓鍛)

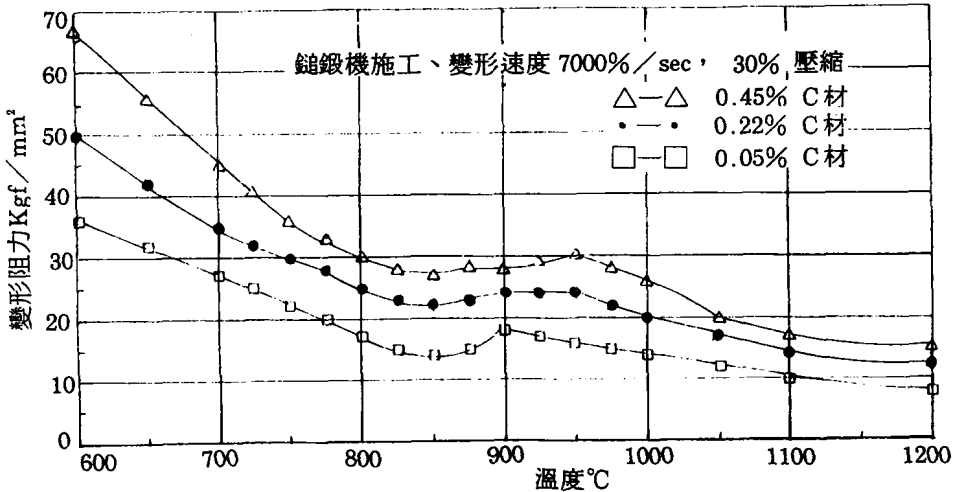


圖 1-12 各種碳鋼變形阻力與加工溫度之關係 (鎚鍛)

於800°C附近之曲線變化，乃起因於鋼材之 $\alpha \rightarrow \gamma$ 變態所致。較之於冷間加工，溫間及熱間加工之變形速度對變形阻力之影響特大；除此之外，加工深度、變形均勻性也呈示甚大差異。

1.2.7 變形力及變形能量

12 熱鍛模具設計手冊

要計算鍛造品成形荷重及變形能量，必須考慮種種因素。材料之變形抵抗、應變速度、鍛造溫度、摩擦、製品形狀等皆為考慮之因素。其影響關係如圖 1-13 所示。

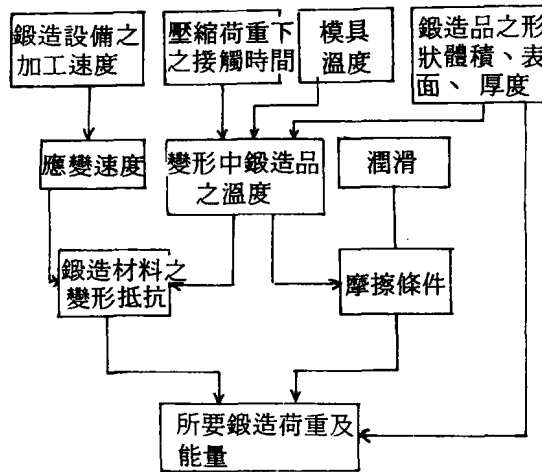


圖 1-13 鍛造荷重、能量之影響因素

一般的鍛造荷重可以下式表示：

$$P = F \cdot C \cdot \sigma_s$$

P：鍛造荷重

F：材料與模具接觸之投影面積

σ_s ：變形抵抗

C：拘束係數（由形狀及摩擦條件決定之係數）

單向鍛造能量可以下式表示：

$$E = \int_{S_0}^{S_1} P ds$$

E：變形能量

S_0 ：變形開始之位置

S_1 ：變形終了之位置

圖 1-14 所示為鍛造荷重與能量之關係圖。